

# 横向磁通径向位移传感器研究

薛莲晓<sup>1</sup>, 张 凯<sup>1</sup>, 徐 阳<sup>1</sup>, 刘哲鸣<sup>2</sup>

(1. 清华大学工程物理系 北京 100084; 2. 北京博工兴业工程咨询有限责任公司 北京 100041)

**摘要:**横向磁通传感器是一种对转子径向位移进行测量的新型传感器。与传统的涡流或电感式传感器相比,其凭借独特的探头设计,具有高性价比、高精度、高灵敏度、结构紧凑等优点。通过理论分析,研究了影响该传感器灵敏度的若干因素。建立有限元模型,通过仿真明确了传感器探头设计的要点,总结了设计规律。设计并优化实验电路,搭建实验平台完成了对传感器的性能测试,结果表明该传感器具有良好的灵敏度、线性度和极低的 X-Y 耦合度。将此传感器成功应用于某主动式磁轴承转子的位移检测,实现了稳定悬浮,并且转速达到了 12 000 r/min。

**关键词:** 横向磁通; 电涡流传感器; 有限元分析; 主动式磁轴承

**中图分类号:** TP212.12 TH822      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Research on transverse flux radial displacement sensor

Xue Lianxiao<sup>1</sup>, Zhang Kai<sup>1</sup>, Xu Yang<sup>1</sup>, Liu Zheming<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Bogongxingye Engineering Consulting Co. Ltd, Beijing 100041, China)

**Abstract:** The transverse flux sensor (TFS) is a new type of sensor designed for rotor radial displacement measurement. Compared with conventional eddy current or inductive sensors, relying on its unique probe design, TFS has the advantages of high cost-efficiency, high accuracy, high sensitivity and ultra-compact structure. Through theoretical analysis, the factors influencing the sensitivity of the sensor are researched. With establishing the finite element model, the key points of the sensor probe PCB design are clarified with simulation, and then the design rules applied to TFS are summarized according to the simulation results. The experiment circuit was designed and optimized, the experiment platform was built, and the performance test of the sensor was completed. Experiment results show that the sensor has good sensitivity, linearity and very low X-Y coupling. The TFS was successfully applied to the rotor displacement measurement of an active magnetic bearing system, and a stable levitation at 12 000 r/min was achieved.

**Keywords:** transverse flux; eddy current sensor; finite element analysis; active magnetic bearing

## 1 引言

与常规的机械轴承相比,电磁轴承具有无接触、无需润滑、无磨损、转速高、控制精度高、维护成本低、寿命长等优点,因而广泛地应用于真空和洁净系统、机械制造工具、医疗设备、透平机械等领域<sup>[1-4]</sup>。在超高速电磁轴承系统中,对高速旋转的转子进行高精度的位置检测是一大难题。这要求在径向位移的检测中,传感器要有良好的带宽和分辨率。传统的涡流或电感传感器具有较高的

带宽和分辨率,但是其探头线圈一般需要手动绕制,如果缺乏特殊的制作工艺与设备,在小批量的制作中难以达到满意的精度和均一性。此外在某些使用场合,要求传感器所占用的空间尽可能小,有必要研究紧凑型的传感器<sup>[5-7]</sup>。

2003年,Bühler P等人<sup>[8]</sup>提出了一种新型的径向位移传感器。该传感器直接将感应元件印制在PCB上,并包围着中心的待测转子。这使得感应元件足够地接近中心的转子,可以获得较高的灵敏度的同时,减小了传感器的空间占用。此后 Larsonneur R等人<sup>[7]</sup>、Burdet L等

人<sup>[10-11]</sup>和 Muesing A 等人<sup>[12]</sup>先后对此传感器的线圈布局,温漂特性等做了研究,并将此传感器实际应用到了高速永磁电机、余热回收装置等系统<sup>[6, 13]</sup>。

Zingerli 建议将此类传感器称作横向磁通传感器 (transverse flux sensor, TFS),也可称电涡流径向位移传感器。相比传统的涡流传感器,它的探头部分仅包含印制了多层线圈的 PCB。其优点包括:1)通过成熟的 PCB 制板技术替代人工绕制线圈,降低批量生产成本;2)由于感应元件印制在 PCB 上,紧贴着中心的待测转子,因而灵敏度可以做到比较高;3)横向磁通传感器检测部分仅有薄薄一层 PCB,比传统的多个探头组合更节省空间,在磁轴承小型化中有更好的应用。

在国外已有的工作中,关于传感器的 PCB 设计是研究重点。在关于 PCB 上铜箔走线的线宽和线距取值上, Muesing A 等人<sup>[12]</sup>认为应当保证走线路径尽可能紧凑,以接近转子获得最大的灵敏度,因而其统一采用  $150\ \mu\text{m}$  (制造商的工艺极限水平)作为铜箔走线的宽度与间距。本文的工作构建了不同的设计规律。在研究过程中发现,一味地追求工艺极限是不确切的,采用较小的线宽与线距固然使得转子更接近感应线圈,但感应线圈的电阻也变得较大,具体的收益如何需要更细化的分析。此外,关于此传感器的驱动线圈激励电路,与文献[4-5, 9]中传感器采用的交流恒流源不同,本文采用交流恒压源,且通过差动激励提高了实际施加到激励线圈两端的电压,明显地提升了灵敏度。

本文进一步推导阐述了传感器的位置检测原理,仔细分析了影响传感器性能的因素;借助有限元分析软件探索了横向磁通传感器的探头 PCB 设计流程,总结出了一套行之有效的设计方法;构建并优化实际电路,搭建测试平台完成了传感器的性能测试,传感器各项参数均达到预期水平;将此传感器应用于电磁轴承主轴转子的位移检测,初步实现了稳定悬浮,转速达  $12\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 。

## 2 横向磁通传感器原理

横向磁通传感器的基本结构如图 1 所示<sup>[12]</sup>,它由中心的转子,一个围绕转子的激励线圈,以及 4 个包围着激励线圈的感应线圈组成。激励线圈由 MHz 量级的高频电压/电流驱动产生交变的磁场,中心的导电转子在交变的磁场中产生涡流,根据趋肤效应,频率越高,涡电流会越趋于转子表面。涡电流也会产生与原磁场方向相反的磁场,去反抗原磁场的变化。四周的感应线圈处于原磁场和涡电流产生的磁场中,也产生感应电流,进而也产生感应磁场。

图 2 所示为横向磁通传感器进行位置检测的原

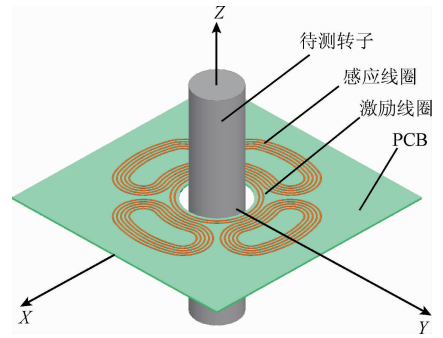


图 1 横向磁通传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transverse flux sensor

理<sup>[12]</sup>。当转子处于中心时,如图 2 (a) 所示,由于结构对称,整个空间的磁场也是对称的,相对的感应线圈和激励线圈的互感是某确定值。

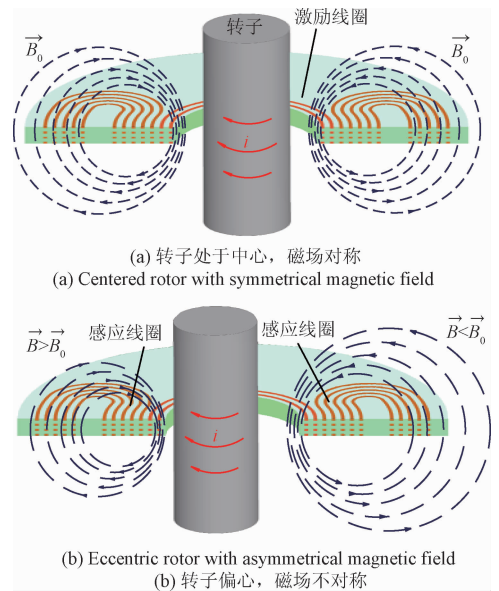


图 2 位置检测原理

Fig. 2 Illustration of the position detection principle

当转子的位移发生变化时,转子表面的涡电流产生的磁场发生偏移,如图 2 (b) 所示,当转子朝左偏,左侧的总磁场增强,对应的磁感线变密;相应地,右侧的总磁场减弱,对应的磁感线变疏。相对的两个感应线圈中的感应电流不再对称,其与中心激励线圈的互感也不再相等,转子远离的一侧其互感  $M_1$  减小,转子接近的一侧其互感  $M_2$  增大,将会产生互感差  $M_{\text{eff}} = M_2 - M_1$ ,且互感差与转子的位移相关。

横向磁通传感器工作时,可以等效为图 3 所示的电路,图中  $L_{\text{exc}}$  和  $L_{\text{sens}}$  为激励线圈和感应线圈的电感,  $R_{\text{exc}}$  和  $R_{\text{sens}}$  为 PCB 上的铜箔走线电阻 (考虑高频信号激励下铜

箔走线之间的趋肤效应和邻近效应后的结果)。\$C\_{exc}\$ 和 \$C\_{sens}\$ 为激励线圈和感应线圈电路为了形成谐振所匹配的电容。当转子发生位移时,激励线圈和相对的两个感应线圈之间就会产生互感差 \$M\_{eff}\$。

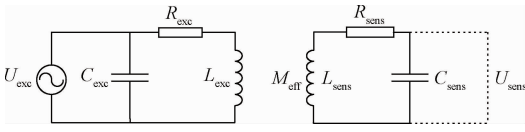


图3 横向磁通传感器的等效电路

Fig.3 The equivalent circuit of transverse flux sensor

根据基尔霍夫电压定律,感应线圈电路方程如下:

$$R_{sens} I_{sens} + j\omega L_{sens} I_{sens} + \frac{I_{sens}}{j\omega C_{sens}} - j\omega M_{eff} I_{exc} = 0 \quad (1)$$

由式(1)可以解出感应线圈电流 \$I\_{sens}\$,则感应线圈电路的输出电压,即电容 \$C\_{sens}\$ 两端的电压 \$U\_{sens}\$ 为:

$$U_{sens} = \frac{I_{sens}}{j\omega C_{sens}} = \frac{j\omega M_{eff} I_{exc}}{j\omega C_{sens} R_{sens} - \omega^2 C_{sens} L_{sens} + 1} \quad (2)$$

当调整激励线圈电路和感应线圈电路的谐振频率一致,均等于激励频率时,传感器工作在最佳状态,记该频率为 \$f\$。假定电阻极小,当且仅当感应线圈电路 \$RLC\$ 串联谐振时,谐振频率满足:

$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

对于激励电路,当 \$RL-C\$ 并联谐振时,其等效阻抗为:

$$Z_{exc} = \frac{4\pi^2 f^2 L_{exc}^2}{R_{exc}} \quad (4)$$

谐振时,激励线圈的品质因数为:

$$Q_{exc} = \frac{2\pi f L_{exc}}{R_{exc}} \quad (5)$$

为了驱动激励线圈,需施加高频电压/电流,本文采用交流恒压源,假设施加到激励线圈两端的电压为 \$U\_{exc}\$,则谐振时通入到激励线圈中的电流为:

$$I_{exc} = \frac{U_{exc}}{Z_{exc}} \cdot Q_{exc} \quad (6)$$

将(3)~(6)代入到式(2),可得到谐振时感应线圈两端的电压为:

$$U_{sens} = 2\pi f \frac{U_{exc}}{L_{exc}} \cdot \frac{M_{eff} L_{sens}}{R_{sens}} \quad (7)$$

可以看到,影响传感器的电压输出的变量主要有激励频率 \$f\$、驱动电压 \$U\_{exc}\$、激励线圈的电感 \$L\_{exc}\$、感应线圈的电感 \$L\_{sens}\$、感应线圈的电阻 \$R\_{sens}\$ 以及互感差 \$M\_{eff}\$。

分析这些影响因素,考虑到供电、器件选型等因素,能够加到激励线圈两端的电压 \$U\_{exc}\$ 存在上限,一般幅值为 \$\pm 12\$ V;激励频率 \$f\$ 由外部输入,理论上其越大,传感器的灵敏度也越高,但设计值要考量电路驱动能力;其余因素可以归结为探头 PCB 上激励线圈和感应线圈的固

有参数,期望一个理想的探头 PCB 设计方案,应该使得 \$M\_{eff} \cdot L\_{sens} / (L\_{exc} \cdot R\_{sens})\$ 取得最大值。而这一过程,就要借助有限元仿真来进行优化设计。

### 3 有限元仿真

对传感器进行仿真模拟,实际上是在对模型进行电磁场计算。电磁场数值计算方法大致可以分为两类:1)微分方程法,着重于从数值化的微分方程中求解出场域的场量,如有限元法 (finite element method, FEM)、传输线矩阵法 (transmission-line matrix, TLM) 等;2)积分方程法,着重于求解场源分布,如部分元等效电路法 (partial element equivalent circuit, PEEC)、边界元法 (boundary element method, BEM) 等<sup>[14-16]</sup>。这两类方法均可以直接或间接求解出电磁场的场量,但是从计算复杂度上来说,当场域范围不大的时候,采用积分方程法更有优势<sup>[15]</sup>。在横向磁通传感器研究过程中,国外相关工作采用的就是部分元等效电路法<sup>[12]</sup>。在本文工作中,由于预期要测量的转子直径较大,场域空间已经不能算小,因此选用比较成熟的有限元方法进行建模,所使用的软件为 ANSYS Electronics<sup>[17]</sup>。

本文主要借助 ANSYS Electronics 的涡流场解算器求解涡流场,计算在趋肤效应、邻近效应的影响下,激励线圈和感应线圈的互感随频率,转子位移的变化趋势,以及不同布局下的线圈电感、电阻参数。

某仿真模型如图4所示。在建立模型的过程中,用圆形线圈替代了实际的螺旋线圈,经过仿真验证,两种线圈的计算结果是等效的。基于此仿真模型,着手进行 \$M\_{eff} \cdot L\_{sens} / (L\_{exc} \cdot R\_{sens})\$ 的优化工作。首先研究互感差 \$M\_{eff}\$ 的变化。由于趋肤效应的影响,高频下,转子内的涡电流趋向于内表面。频率越高,涡电流越集中于表面,互感差越大,当频率高至趋肤深度极小,几乎可以认为是表面电流时,互感差趋于饱和,不再继续增加<sup>[12]</sup>。

当转子在中心位置时,由于对称性,两侧激励线圈与感应线圈的互感差为0。如图4所示,设定转子 \$Y\$ 方向位移不变,在不同的频率下,在 \$X\$ 方向改变转子的位移,模拟转子在空间中的移动,以研究互感差 \$M\_{eff}\$ 与位移、频率的关系。图5所示为转子在 \$X\$ 方向的位移分别为 0、50、100、150、200 \$\mu\$m 时,两侧感应线圈与中心激励线圈互感的差值变化。可以看到随着激励频率的不断升高,互感差不断上升且接近饱和,某一固定频率下互感差与位移呈现一定的线性。对应到式(7),可以得到式(8),相对的感应线圈其感应电压之差与位移正相关,正是该传感器得以进行位移测量的理论基础。

$$U_{sens} = 2\pi f U_{exc} \cdot M_{eff} \cdot \frac{L_{sens}}{L_{exc} R_{sens}} \propto M_{eff} \propto x \quad (8)$$



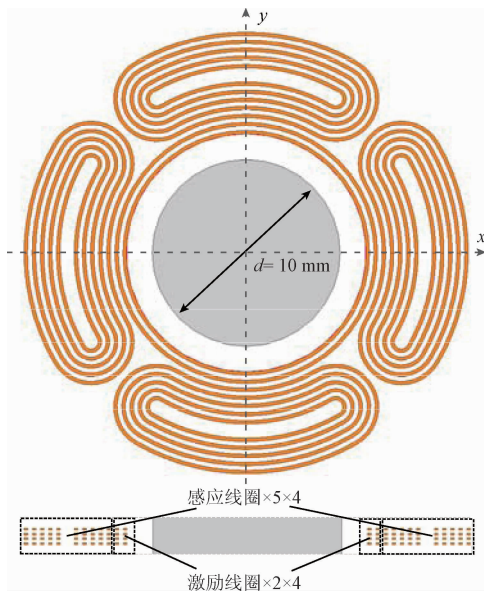


图4 仿真模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the simulation model

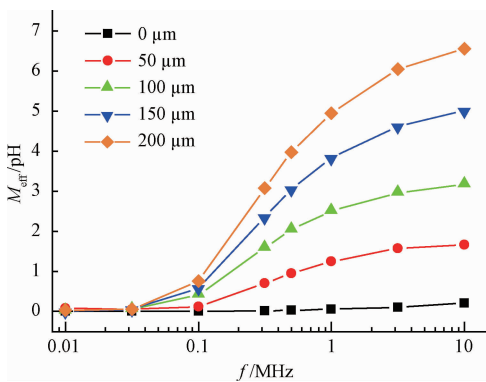


图5 X方向不同位移下互感差随频率的变化趋势

Fig. 5 The changing trend of mutual inductance difference vs. frequency under different X direction displacement

考虑到  $M_{\text{eff}}$  随频率饱和的特性, 1 ~ 8 MHz 是比较适合的激励频率取值。低于该频率区间, 传感器难以达到较高的灵敏度。超出该区间, 过高的激励频率下谐振电路会通过线圈向空中发射能量, 能量耗散比较严重, 受限芯片性能, 对应的激励线圈驱动电路设计也比较困难。

对于  $M_{\text{eff}} \cdot L_{\text{sens}} / (L_{\text{exc}} \cdot R_{\text{sens}})$  的设计优化。这完全由激励线圈和感应线圈的布局和形状所决定。直观地,  $M_{\text{eff}}$  对位移的变化越敏感,  $L_{\text{sens}}$  越大,  $L_{\text{exc}}$  越小,  $R_{\text{sens}}$  越小, 传感器的灵敏度越高。

首先讨论感应线圈的电阻  $R_{\text{sens}}$ 。对于实际的布局, 要想减小  $R_{\text{sens}}$ , 有 3 个方面的考量: 1) 加厚铜箔; 2) 增加线宽; 3) 缩短走线路径。在 MHz 的高频信号激励下,

PCB 上铜导线的趋肤效应和邻近效应对其阻抗有很大影响, 因此仿真中需要考虑铜箔厚度是否能无限增加。由趋肤深度的定义式  $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$  [18-19], 在 3 MHz 下, 铜 ( $\sigma = 5.96 \times 10^7 \text{ S/m}$ ,  $\mu = 1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ) 的趋肤深度为  $37.6 \mu\text{m}$ , 因此可以认为, 当铜箔导线的厚度超过两倍趋肤深度, 即  $75.2 \mu\text{m}$  后, 由于趋肤效应, 其厚度继续增加已经无法带来有效的阻抗降低。因此设计中, 铜箔厚度不超过  $105 \mu\text{m}$ 。增加线宽意味着相邻走线之间的间距也增加, 铜箔的厚度可以做得更厚, 而缩短走线路径意味着结构上尽量紧凑。

相对于 Musing A 等人 [12] 的观点, 小线宽线距以达到制作工艺极限, 本文提出了不同的观点。本文认为采用较大的线宽线距, 可以使得铜箔厚度增加, 以获取更小的  $R_{\text{sens}}$ , 当然线宽线距也不可过大, 过大的线宽线距存在问题: 1) 应对较小直径的转子时, 周围的布线空间紧张; 2) 过大的线宽客观上使得线圈远离转子, 造成灵敏度损失; 综合来看, 应当通过仿真确定适当的线宽线距, 而非一味求工艺极限。表 1 所示为 3 种不同的线宽线距下传感器能达到的灵敏度 (以最低的灵敏度进行了归一化)。显然在较大的线宽线距下, 铜箔宽度与厚度增加带来的  $R_{\text{sens}}$  降低占据主导地位, 这使得传感器的灵敏度有较大的提升。针对直径 32 mm 的转子, 选取  $177.8/254.0 \mu\text{m}$  作为线宽线距是比较合适的 (注: 过厚的铜箔不利于加工, 且应用场合限制了布线的面积, 所以并未取更大值)。

表1 不同线宽线距下传感器的理论灵敏度对比

Table 1 The theoretical sensitivity comparison of the sensor under different track width and track spacing

线宽/ $\mu\text{m}$	线距/ $\mu\text{m}$	铜箔厚度/ $\mu\text{m}$	归一化灵敏度
177.8	254.0	105	1.93
152.4	203.2	70	1.69
101.6	101.6	35	1

接下来讨论互感差  $M_{\text{eff}}$ 、感应线圈电感  $L_{\text{sens}}$  和激励线圈电感  $L_{\text{exc}}$ 。具体地, 感应线圈的设计, 应当适当增加其圈数与包围空间的面积, 以获得较大的电感; 激励线圈应当使其圈数较少, 以获得较小的电感。但激励线圈的圈数减小时, 相应地, 激励线圈和相对的感应线圈互感差  $M_{\text{eff}}$  也降低了, 因此需要仿真来选择合适的激励线圈圈数 (也要综合考虑实际的驱动能力, 当激励线圈的圈数过小时, 激励线圈谐振时等效阻抗较低, 进而导致激励线圈驱动电路负荷较重难以带载, 因此激励线圈的电感量不可太小)。

综合考虑以上影响因素和实际需求 (待检测转子直径 32 mm), 本文通过仿真优化后的模型参数如表 2 所示。

表2 优化后的传感器模型参数

Table 2 The optimized sensor model parameters

参数	值
线宽-线距/ $\mu\text{m}$	177.8/254.0
激励频率/ $f/\text{MHz}$	3
互感差/位移 $M'_{\text{eff}}(x)/(\text{nH} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	0.26
激励线圈电感 $L_{\text{exc}}/\mu\text{H}$	3.36
激励线圈电阻 $R_{\text{exc}}/\Omega$	4.18
激励线圈品质因数 $Q_{\text{exc}}$	15.16
感应线圈电感 $L_{\text{sens}}/\mu\text{H}$	24.60
感应线圈电阻 $R_{\text{sens}}/\Omega$	10.22
感应线圈品质因数 $Q_{\text{sens}}$	45.36

### 4 实验平台

为了测试该传感器的实际性能,搭建实验平台对其性能进行测试。实验平台如图6所示,围绕传感器所在的探头 PCB,包括为其提供高频交流激励信号的驱动电路,模拟实现转子位移的平动台和待测转子,将探头 PCB 上感应线圈的信号进行解调滤波处理的信号调理电路,以及数据采集卡和计算机。

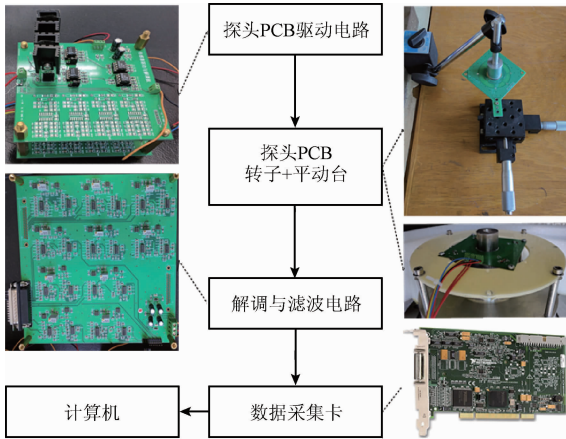


图6 实验平台

Fig.6 Experimental platform

图6所示的平动台可以实现对模拟转子的位移测量,其测量范围为 $\pm 1\text{ mm}$ (精度 $10\ \mu\text{m}$ ),实验中,驱动电路给激励线圈供给 $3\text{ MHz}$ 的正弦电压信号。通过平动台模拟调整转子的位移,感应线圈上的输出信号随即发生变化,将相对的两个感应线圈上的电压信号作差动后,经过解调板的解调和滤波,即可得到包含模拟转子位移的有效信号( $X-Y$ ),该信号通过数据采集卡被采集到计算机以供后续的处理。

关于激励线圈驱动电路,国外相关文献多采用交流

恒流源<sup>[4,5,9]</sup>,即图7(a)所示。对于交流恒流源,电路设计中要加入 $V-I$ 转换电路,改换用交流恒压源后,如图7(b)所示,这样可以舍去 $V-I$ 转换电路。经过实验验证,交流恒流源和交流恒压源的效果是一致的,均可以使传感器的激励线圈正常的工作。

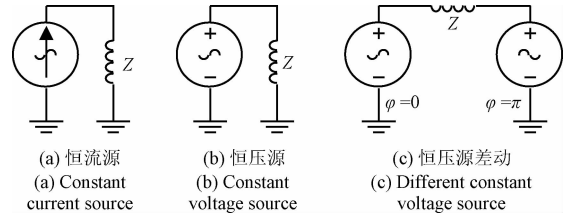
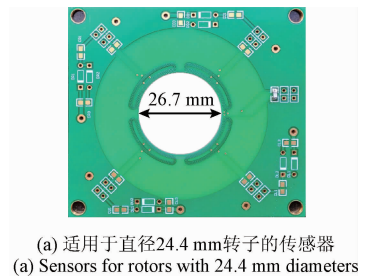


图7 激励线圈驱动方式对比

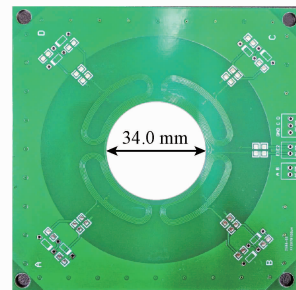
Fig.7 Comparison of the excitation coil driving circuits

将激励线圈谐振电路等效为阻抗 $Z$ ,对于交流电源,一般认为其带载的运放输出电压摆幅受到供电电压( $\pm 15\text{ V}$ )和实际性能限制,因此采用交流恒压源,实际施加到激励线圈两端的电压仅为 $\pm 12\text{ V}$ 。进一步改进,可以用恒压源差动激励线圈。如图7(c)所示,等效阻抗 $Z$ 两侧的恒压源的交流信号相位相差 $180^\circ$ ,二者差动激励线圈。在同样的供电电压和器件下,加载到激励线圈上的电压加倍,理论可达 $\pm 24\text{ V}$ (实验中由于相位差并不能精确达到 $180^\circ$ ,电压会有所损失)。由式(7)可知,传感器的灵敏度获得了明显地提升。

图8所示为对不同直径的转子进行位移测量的探头 PCB,其中图8(b)的设计参数见表2。



(a) 适用于直径24.4 mm转子的传感器  
(a) Sensors for rotors with 24.4 mm diameters



(b) 适用于直径32.0 mm转子的传感器  
(b) Sensors for rotors with 32.0 mm diameters

图8 横向磁通传感器 PCB 实物

Fig.8 Two photos of the transverse flux sensor PCB

## 5 传感器测量结果

传感器的性能,主要关注其灵敏度,线性度等,对于横向磁通传感器,还需特别关注其  $X$ - $Y$  方向测量的耦合程度。

由于横向磁通传感器特殊的结构设计,其灵敏度较高(注:本文所谈及灵敏度均为初始灵敏度,未经放大),在本文的实验结果中,灵敏度很容易达到  $6 \sim 10 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 。对直径  $24.4 \text{ mm}$  的模拟铝制转子,采用图8(a)所示的传感器进行实验,当转子沿  $Y$  方向运动时,其输出结果如图9所示。该传感器在  $Y$  方向的灵敏度达到了  $6.56 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 。在整个量程 ( $\pm 1.1 \text{ mm}$ ) 下,其线性度达  $4.90\%$ 。

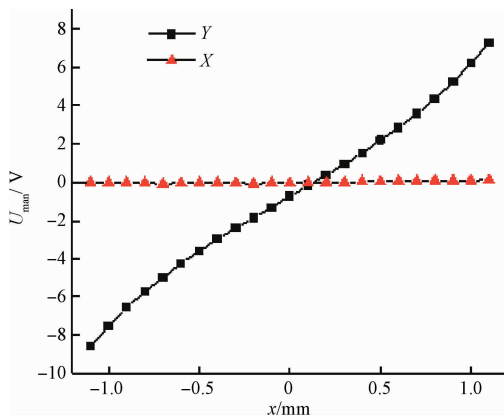


图9 传感器的线性和  $X$ - $Y$  耦合特性

Fig. 9 Linearity and  $x$ - $y$ -coupling characteristic of the TFS

图9中传感器在  $X$  方向的输出近乎一条直线。可以看到,当传感器在  $Y$  方向运动的时候,  $X$  方向的测量结果扰动很小。换言之两个方向测量的耦合程度很低 ( $1.95\%$ )。当转子在零位时,  $Y$  方向的电压输出略低于  $0 \text{ V}$ ,这是由于传感器安装过程中的微小偏差,以及  $Y$  方向的两个感应线圈的电路参数并不完全一致导致的,因此该传感器安装过程需要小心地调零与校正。

本文研制的传感器与国外相关文献中同类传感器的参数对比如表3所示,其中#4为本文研制的传感器,对比针对近似尺寸的转子进行径向位移测量,结构设计相近的横向磁通传感器,可以有如下推论:

1) 横向磁通传感器能够达到的灵敏度与转子的直径有关。一般来说转子直径越大,灵敏度越容易设计高。

2) 横向磁通传感器的线性度与转子移动范围相关。当转子的移动范围较大时,线性度较差 (#2、#4),而当移动范围较小时,线性度就有很大的改善 (#3)。这表明横向磁通传感器在小位移范围内,其输入输出有良好的线性,而当转子位移较大时,就需要考虑非线性因素,对传感器的输入输出作非线性拟合。

3) 横向磁通传感器的  $X$ - $Y$  耦合度良好,同类型传感器耦合度均低于  $2\%$ 。

表3 本文研制的传感器与已有的同类传感器性能对比

Table 3 Performance comparison between the TFS described in this paper and existing same kind of TFSs

编号	时间	转子直径/ mm	移动范围/ mm	灵敏度/ ( $\text{mV} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$X$ - $Y$ 耦合度/%	线性度/%
#1 <sup>[6]</sup>	2011年9月	3	$\pm 0.375$	1.33	-	-
#2 <sup>[7]</sup>	2014年8月	10	$\pm 1.0$	4	1.24	5.6
#3 <sup>[11]</sup>	2006年3月	51.5	$\pm 0.4$	4.75	1.99	1.14
#4	2016年10月	24.4	$\pm 1.1$	6.56	1.95	4.90

评价传感器的灵敏度时,可以参照一个指标,即当转子在传感器整个量程内运动时,单侧的感应线圈上的电压变化幅度。某文献提及其所制横向磁通传感器通常能达到  $10\% \sim 20\%$  的变化率<sup>[7]</sup>。对于本文研制的传感器,该参数能达到  $19\% \sim 32\%$ 。这也表明了本文所制传感器的性能良好。

为了测试横向磁通传感器的实际性能,用其检测某电磁轴承主轴的转子位移,成功实现了稳定悬浮,转速达到了  $12\,000 \text{ r/min}$ ,转子在该转速下的运动轨迹如图10所示,实验中传感器的位移测量范围为  $\pm 200 \mu\text{m}$ ,转子悬浮稳定后轴心轨迹运动范围最大不超过  $\pm 30.3 \mu\text{m}$ 。

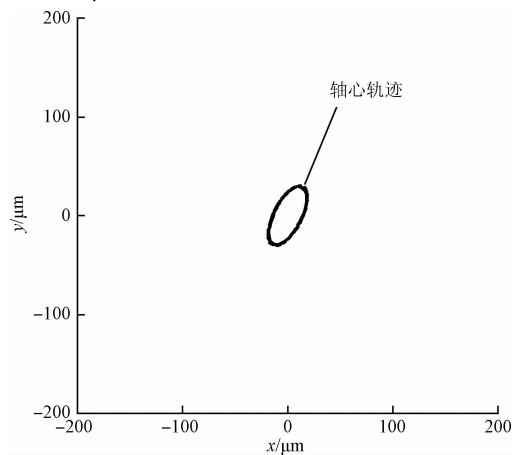


图10 转子轴心轨迹

Fig. 10 Trajectory of the rotor axis center

## 6 结论

本文研究了专用于电磁轴承领域检测转子位移的横向磁通传感器,通过理论推导,有限元分析,总结出了横

向磁通传感器的设计规律,给出了一组优化后的,适用于32 mm直径转子的模型参数。通过搭建实验平台,完成了对传感器的性能测试,研制的横向磁通传感器在灵敏度(6.56 mV/ $\mu\text{m}$ ),X-Y方向测量的耦合程度(1.95%)、线性度(4.90%)等方面有着良好的表现。此外还成功进行了转速达12 000 r/min的电磁轴承主轴转子稳定悬浮实验。所设计的横向磁通传感器性能良好,达到了预期水平。

未来的工作将包括,进一步探索横向磁通传感器可能的优化方向和应用特点,设计小型的永磁轴承,用横向磁通传感器实现转子的位移检测。

### 参考文献

- [ 1 ] SCHWEITZER G, MASLEN E H. 徐旻, 张凯, 赵雷, 译. 磁悬浮轴承—理论, 设计及旋转机械应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.  
SCHWEITZER G, MASLEN E H. XU Y, ZHANG K, ZHAO L, trans. Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [ 2 ] 汪希平, 王金贵. 轴向磁悬浮轴承用非接触式差动电感位移传感器的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 1998, 19(6): 615-619.  
WANG X P, WAN J G. Investigation on contactless displacement sensors for active magnetic bearings [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1998, 19(6): 615-619.
- [ 3 ] 吕春峰, 朱建平, 匡兴红, 等. 变面积式电涡流传感器线圈阻抗理论计算模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1907-1914.  
LV CH F, ZHU J P, KUANG X H, et al. Calculation model for coil impedance of area-variable eddy current sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12): 1907-1914.
- [ 4 ] 杨光, 李金国, 苏兴荣. 提高电涡流传感器可靠性试验和分析方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(2): 35-39.  
YANG G, LI J G, SU X R. Test and analysis of reliability improvement for eddy current sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2007, 21(2): 35-39.
- [ 5 ] IMBERDORF P, ZWYSSIG C, ROUND S, et al. Combined radial-axial magnetic bearing for a 1 kW, 500, 000 rpm permanent magnet machine [C]. Proceedings of the Applied Power Electronics Conference, 2007: 1434-1440.
- [ 6 ] ZINGERLI C M, IMBERDORF P, KOLAR J W, et al. Rotor position measurement for a magnetically levitated 500 000 rpm permanent magnet machine [C]. Proceedings of the Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011: 1778-1784.
- [ 7 ] LARSONNEUR R, BÜHLER P. New radial sensor for active magnetic bearings [C]. Proceedings of the 9th International Symposium on Magnetic Bearings, 2004: 3-6.
- [ 8 ] BÜHLER P. Device for contact-less measurement of distances in multiple directions, WO2004048883 A1 [P/OL]. 2004-06-10.
- [ 9 ] BÜHLER P. Eddy-current sensor and magnetic bearing device, WO2006074560 A2 [P/OL]. 2006-05-26.
- [ 10 ] BURDET L. Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications [D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2006.
- [ 11 ] BURDET L, MAEDER T, SIEGWART R, et al. Thick-film radial position sensor for high temperature active magnetic bearings [C]. Proceedings of the 10th International Symposium on Magnetic Bearings, Martigny, 2006.
- [ 12 ] MUESING A, ZINGERLI C, IMBERDORF P, et al. PEEC-based numerical optimization of compact radial position sensors for active magnetic bearings [C]. 5th International Conference on Proceedings of the Integrated Power Systems (CIPS), 2008: 1-5.
- [ 13 ] HAWKINS L A, ZHU L, BLUMBER E J. Development of a 125 kW AMB expander/generator for waste heat recovery [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(7): 072503.
- [ 14 ] 王春兰, 张钢, 董鲁宁, 等. 电涡流传感器的有限元仿真研究与分析 [J]. 传感器与微系统, 2006, 25(2): 41-43, 46.  
WANG CH L, ZHANG G, DONG L N, et al. Study and analysis of eddy-current sensor by FEM simulation [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(2): 41-43, 46.
- [ 15 ] 丛国瑞. 基于部分元等效电路的电磁建模方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.  
CONG G R. Study of electromagnetic modeling approach based on partial element equivalent circuit [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [ 16 ] 于亚婷, 杜平安, 廖雅琴. 线圈形状及几何参数对电涡流传感器性能的影响 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6): 1045-1050.  
YU Y T, DU P AN, LIAO Y Q. Study on effect of coil shape and geometric parameters on performance of eddy



current sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(6): 1045-1050.

- [17] 赵博, 张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.  
ZHAO B, ZHANG H L. The application of Ansoft 12 in the electromagnetic engineer fields[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.
- [18] 吴德会, 游德海, 柳振凉, 等. 交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 327-336.  
WU D H, YOU D H, LIU ZH L. Mechanism and experimental research on skin depth in AC magnetic flux leakage testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2): 327-336.
- [19] 邵英秋, 程德福, 王言章, 等. 高灵敏度感应式磁传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 349-355.  
SHAO Y Q, CHENG D F, WANG Y ZH, et al. Research of high sensitivity inductive magnetic sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 349-355.

## 作者简介



薛莲晓, 2015 年于清华大学获得学士学位, 现为清华大学硕士研究生, 主要研究方向为磁轴承和传感器技术。

E-mail: xlx15@mails.tsinghua.edu.cn

**Xue Lianxiao** received his B. Sc. degree in 2015 from Tsinghua University. Now he is a master candidate in Tsinghua University. His main research interest includes magnetic bearings and sensor technologies.



张凯 (通讯作者), 分别在 2000 年和 2005 年于清华大学获得学士和博士学位, 现为清华大学工程物理系副研究员, 主要研究方向为磁轴承、高速旋转机械及振动控制相关技术。

E-mail: zhangkai@mail.tsinghua.edu.cn

**Zhang Kai** (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tsinghua University in 2000 and 2005, respectively. Now, he is an associate research fellow in Department of Engineering Physics, Tsinghua University. His main research interest includes magnetic bearings, high speed rotation machines and vibration control technologies.